

УДК 539.3:621.432.3

*В.Н. Шеремет, асп., Н.А. Ткачук, д-р техн. наук, В.Г. Гончаров, канд. техн. наук*

## **ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДВС ПУТЕМ ДИСКРЕТНОГО УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ. МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ**

### **Введение**

В настоящее время вопросы конструирования и расчета двигателей внутреннего сгорания получили значительное развитие и изложены во многих монографиях, статьях, учебниках [1]. При этом резервы повышения технических характеристик двигателей заложены во многом не только в конструкции, а в технологии изготовления и свойствах материалов, из которых они производятся, и также в свойствах поверхностных слоев деталей двигателей. В связи с этим особое внимание в настоящее время уделяется разработке и внедрению новых прогрессивных технологий обработки поверхностей тяжело нагруженных деталей двигателей, которые позволяют повысить их прочность и износостойкость. В частности, перспективной является технология дискретного упрочнения поверхностных слоев деталей двигателей, описанная, в частности, в работах [2-6]. Ее применение, в отличие от традиционных методов, приводит к одновременно повышению и прочностных, и трибологических характеристик обработанных деталей. При этом открытым остается вопрос определения рациональных параметров технологического процесса дискретного упрочнения. Поскольку прочность и жесткость поверхностных слоев обработанных деталей напрямую связана с исследованием их напряженно-деформированного состояния (НДС), то в работе описаны методы, модели и результаты анализа НДС поверхностных слоев деталей ДВС, обработанных методом дискретного упрочнения, проиллюстрированные на примере коленчатых валов тепловозных двигателей.

### **Постановка задачи**

Целью комплекса научно-исследовательских работ [1-7], проводимых авторами, является повышение ресурса двигателей магистральных тепловозов и других машин путем научного обоснования, создания и внедрения в производство новых комплексных энергосберегающих технологий изготовления и ремонта тяжело нагруженных деталей на базе дискретного упрочнения.

В соответствии с поставленной целью в работе описано решение задачи оптимизации режимов дискретной обработки для получения необходимых прочностных и триботехнических характеристик на основе расчета НДС фрагмента коленчатого вала тепловозного двигателя.

### **Подходы к решению поставленных задач**

Износ поверхностей трения происходит в результате двух разновидностей механического изнашивания – абразивного и усталостного [7]. Таким образом, например, долговечность и ресурс работы коленчатых валов двигателей определяются двумя параметрами – усталостной прочностью изделия и износостойкостью поверхности шеек. Если вопрос повышения усталостной прочности коленчатого вала и вообще всех элементов трибосистем двигателя решается в значительной мере на стадии проектирования и назначения объемной термической обработки, то износостойкость деталей полностью зависит от методов упрочнения их поверхностных элементов.

Общим и наиболее существенным недостатком всех традиционных методов поверхностного упрочнения является то, что они сводятся лишь к повышению твердости материала поверхностного слоя детали. Но, как известно, одна твердость не может однозначно характеризовать износостойкость. В результате вышесказанного ресурс двигателей до отправки на капитальный ремонт в реальных условиях эксплуатации оказывается существенно ниже нормативного.

В данной работе проблема повышения ресурса и надежности двигателей тепловозов решается применением дискретного упрочнения поверхности тяжело нагруженных деталей, работающих в условиях трения [1-7]. Дискретное покрытие наносится электроискровым методом на внешнюю поверхность изделия из легированных материалов в виде расположенных на определенном расстоянии один от другого островков разной конфигурации (метод электроискрового легирования – рис. 1). После этого поверхность шлифуют – происходит срезка приращенной части дискретных покрытий, которые име-

ют макро- и микродефекты, и их поверхность нивелируется относительно поверхности детали. Срезается и внешний слой детали, что делает практически невозможным появление концентраторов напряжений и уменьшает шероховатость поверхности.

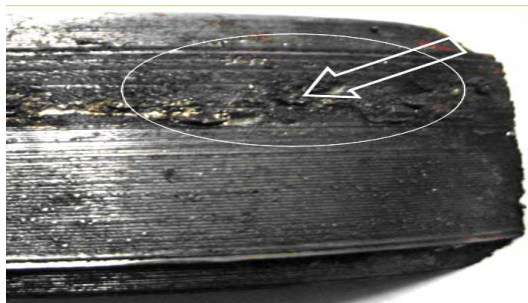


Рис. 1. Вид поверхности после дискретного упрочнения (до шлифования)

Поставленная задача сводится к необходимости проведения многовариантных исследований объекта сложной формы с неоднородными материалами при различных сочетаниях параметров технологического процесса. При этом возникает необходимость разработки общего метода описания расчетных моделей сложных и сверхсложных механических систем, которые учитывают количественные, качественные, структурные характеристики исследуемых объектов.

Для решения задачи предлагается привлечение разработанного и описанного в ряде статей [8-12] метода обобщенного параметрического описания при исследовании характеристик прочности и жесткости элементов сложных механических систем. Анализ НДС исследуемых элементов выполнен с привлечением метода конечных элементов (МКЭ).

#### Численный анализ НДС элементов, поверхности которых обработаны по технологии дискретного упрочнения

Теоретическая база метода обобщенного параметрического моделирования сложных и сверхсложных механических систем, предложенная и реализованная в виде современного мощного программно-аппаратного комплекса, дает возможность перейти к постановке и решению собственно проблемы исследования и обоснования схем и параметров технологических процессов упрочнения поверхностей высоконагруженных машин.

На рис. 3 приведена схема нанесения упрочняющих зон (на примере опорной части вала), а на рис. 4 – параметры технологического процесса.

В работе ставится задача получить результаты исследования НДС фрагмента коленчатого вала, обработанного методом дискретного упрочнения (рис. 2).



Рис. 2. Фрагмент упрочненной части опорной поверхности вала (геометрия показана условно)

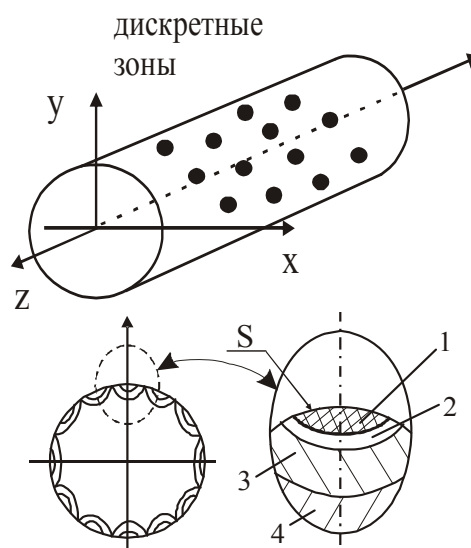


Рис. 3. Схема нанесения и характерные зоны при дискретно-континуальном упрочнении ( $S$  – поверхность упрочнения)

1 – дискретная зона упрочнения – зона «белого металла»; 2, 3 – переходные зоны; 4 – основной материал

Как видно из металлографических исследований [2-6], на поверхности упрочнения  $S$  (рис. 3, 4) в тело основного металла 4 вкрапляется высоколегированный металл (1 – дискретная зона упрочнения – ДЗУ – диаметром  $d$  и глубиной  $h$ ). По толщине дальше идет тонкая зона „белого металла”  $b$ , переходная зона глубиной  $H$ . Размещение ДЗУ на поверхности  $S$  характеризуется шагами  $\tau_{xy}$  в окружном направлении и  $\tau_z$  – в осевом. При этом плотность покрытия поверхности  $S$  (так называемый коэффициент дискретности) определяется зависимостью

$f = \pi d^2 / 4 \tau_{xy} \tau_z$ . Свойства материалов:  $E_i, \nu_i (i = 1, 2, 3, 4)$  – соответственно модули упругости и коэффициенты Пуассона (номера отвечают обозначениям на рис. 5); аналогичная нумерация для  $\sigma_T^i, \sigma_b^i$  – границы текучести и границы прочности материалов. Таким образом, перечень параметров технологи-

ческого процесса дискретно-континуального упрочнения –  $P = \{d, \tau_z, \tau_{xy}, E, \nu, \sigma_T, \sigma_b, h, b, H\}$ , где  $E, \nu, \sigma_T, \sigma_b$  – это вся совокупность индексированных по номеру материала физико-механических и механических свойств материалов.

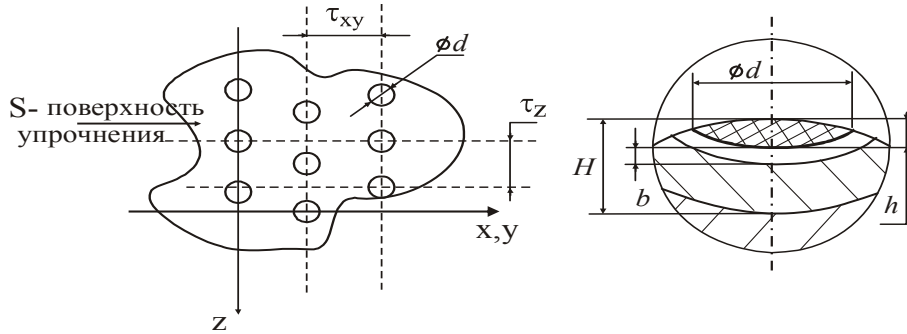


Рис. 4. Параметры технологического процесса

На первом этапе исследования определяется характер НДС в области отдельной дискретной зоны упрочнения. На рис. 5 проиллюстрирована расчетная схема для определения осесимметричной картины НДС в области ДЗУ. Конечно-элементная модель состоит из 1,5 млн. узлов и 403 тыс. элементов.

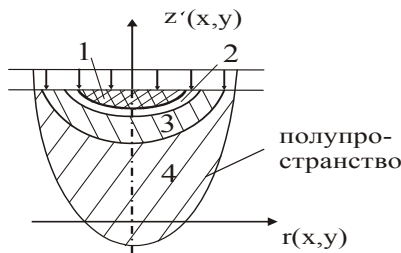
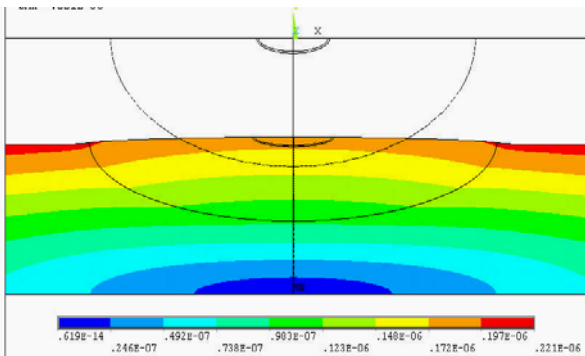
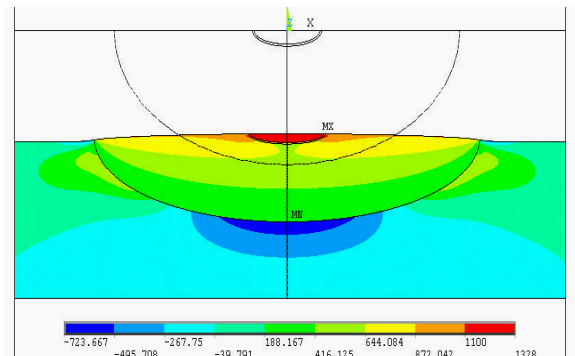


Рис. 5. Расчетная схема для определения НДС в области отдельной ДЗУ

Качественные картины компонент НДС при соотношении модулей упругости  $\alpha_1 = E_1 / E_4 = 1,2$ ;  $\alpha_2 = E_2 / E_4 = 1,1$ ;  $\alpha_3 = E_3 / E_4 = 1,0$ ;



а)



б)

Рис. 6. Компоненты НДС в области ДЗУ

а) вертикальные перемещения; б) первые главные напряжения

Для анализа влияния разных факторов на НДС реальных конструкций, построена пространственная конечно-элементная модель (КЭМ) фрагмента приповерхностной части опорной части вала, подвергнутого дискретно-континуальному упрочнению. Поскольку для полного моделирования опорной части вала нужна слишком большая (сотни миллионов степеней свободы) КЭМ, то было определено репрезентативное множество ДЗУ, которое входит в состав соответствующего секторного выреза (рис. 7).

На рис. 8, 9 – типичная картина распределения вертикальных перемещений вдоль отрезка прямой, проходящей через центры ДЗУ. Видно, что наблюдается та же картина перемещений, что и в случае единичных ДЗУ, но с периодом повторения, который равен шагу размещения дискретных зон упрочнения.

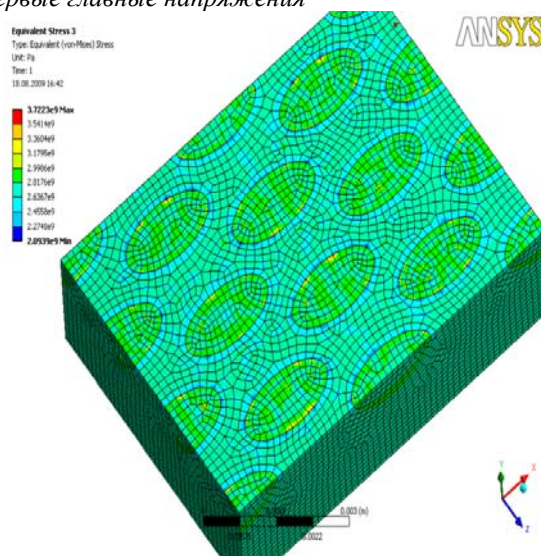
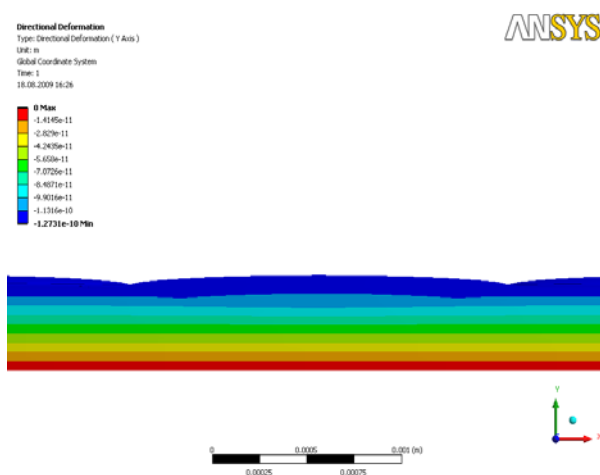
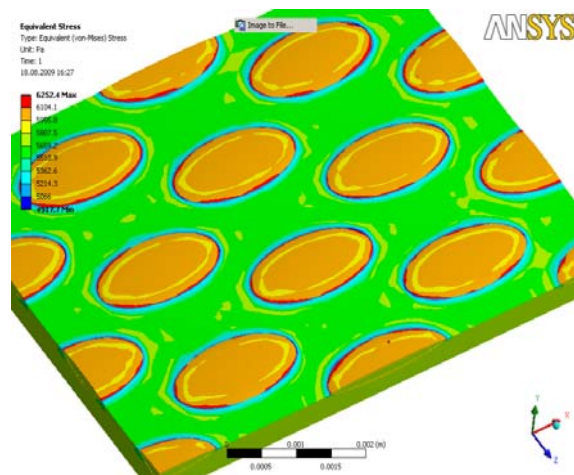


Рис. 7. КЭМ подповерхностного слоя опорной части вала



а)



б)

Рис. 8. Картина перемещений и напряжений в приповерхностном слое детали  
а) деформированное состояние; б) напряженное состояние

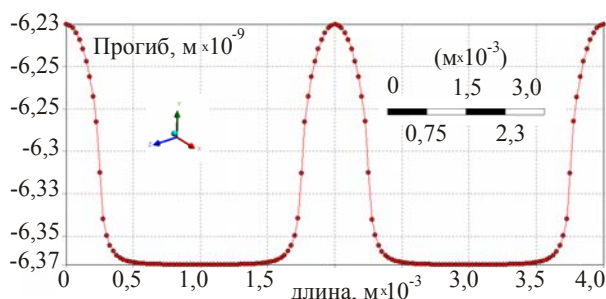


Рис. 9. Картина перемещений поверхности детали

Как видно из сравнительного анализа полученных распределений компонентов НДС (рис. 8–10), увеличение относительной жесткости материала упрочнения способствует усилению позитивного

влияния обнаруженного  $\Delta$ -эффекта упрочнения и увеличению устойчивости поверхности  $S$  к износу. Что касается влияния параметра  $f$ , то наблюдается рекомендованная зона ( $f \in [0,6; 0,8]$ ), при попадании коэффициента дискретности в который  $\Delta$ -эффект наиболее действенный.

Как показал анализ НДС опорной части вала, кроме обнаруженного  $\Delta$ -эффекта, значение имеет еще и так называемый « $\sigma$ -эффект». Он заключается в том, что при совместном деформировании расплавленного материала ДЗУ создается остаточное напряженное состояние, которое при суперпозиции с напряженным состоянием от действия давления  $P$  дает эффект уменьшения уровня результирующих



напряжений. Анализ показывает, что наибольший « $\sigma$ -эффект» достигается в диапазоне  $f \in [0,5 \div 0,8]$ .

Таким образом, сопоставление « $\Delta$ -эффекта» и « $\sigma$ -эффекта» с учетом других требований [2-6] дает возможность определить рекомендованный интервал параметра дискретности покрытия:  $f^* \in$

$[0,65 \div 0,75]$ .

Можно утверждать, что в результате комплекса пробных исследований обоснованы рациональные параметры предложенного технологического процесса дискретно-континуального упрочнения элементов двигателей внутреннего сгорания.

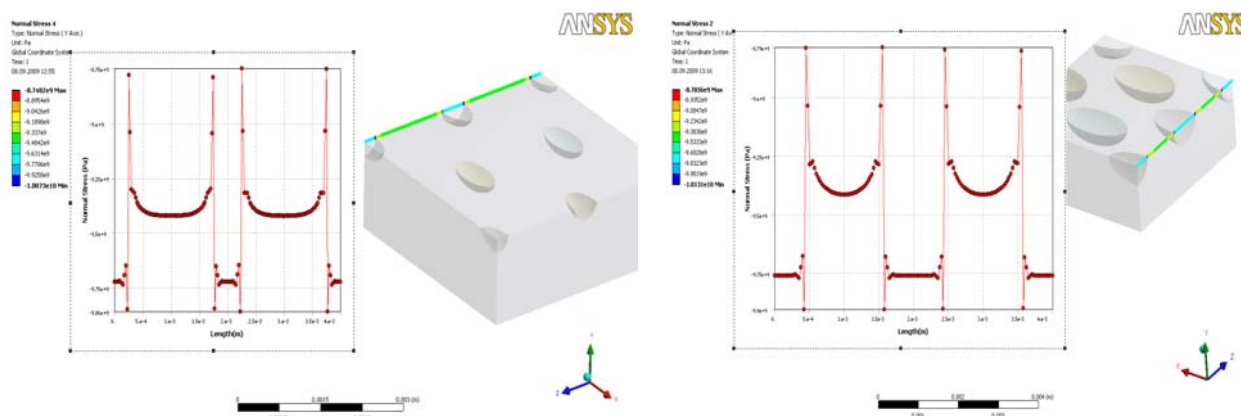


Рис. 10. Картины распределения контактного давления в поверхностном слое детали

### Выводы и рекомендации

В результате проведенных численных исследований установлено:

1. Теоретические основы обобщенного параметрического метода моделирования физико-механических процессов в сложных и сверхсложных механических системах создают потенциальные возможности для глубокого анализа и синтеза параметров новых технологий упрочнения высоконагруженных элементов ДВС.

2. Разработанные конечно-элементные модели адаптируются к анализу и синтезу принципиально новых способов упрочнения высоконагруженных элементов ДВС, что качественно отличает их от построенных традиционными способами.

3. Разработанное теоретико-множественное математическое и программное обеспечение в процессе исследований позволило обнаружить два эффекта, названных « $\Delta$ -эффект» и « $\sigma$ -эффект». Первый из них заключается в позитивном характере изменения деформированного профиля в контакте упрочненного элемента машины с сопряженными элементами. Второй эффект заключается в создании благоприятного остаточного напряженного состояния после упрочнения исследуемого объекта с применением новой дискретно-континуальной технологии, которые после наложения на распределение рабочих напряжений создает такое результирующее напряженное состояние, которое значи-

тельно дальше от опасного уровня, чем для неупрочненных деталей.

Таким образом, проведенные исследования и численное моделирование продемонстрировали новизну и эффективность подходов и моделей, а также позитивность результатов. В конечном результате при масштабных исследованиях могут быть обоснованы параметры технологии дискретно-континуального упрочнения.

В качестве направлений дальнейших исследований можно выделить распространение предложенной технологии на новые виды деталей ДВС, исследование их напряженно-деформированного состояния и выявление новых характерных особенностей применения предложенной технологии.

### Список литературы:

1. Двигуни внутрішнього згорання: серія підручників у 6 томах / За ред. А.П. Марченка та А.Ф. Шеховцова. – Харків: Прапор, 2004.
2. Гончаров В.Г. Повышение износостойкости коленчатых валов форсированных дизелей большой мощности / В.Г. Гончаров, Э.К. Посвятенко, С.С. Дяченко // Резание и инструмент в технологических системах. – 2009. – Вып. 77. – С. 53–65.
3. Гончаров В.Г. Повышение износостойкости трибосистем / В.Г. Гончаров, Б.В. Савченко // Автомобильный транспорт: Сб. научн. тр. Харьк. нац. авт.-дор. ун-та. – 2003. – Вып.13. – С. 117–119.
4. Гончаров В.Г. Исследование изменения характеристик трения по глубине дискретного слоя / В.Г. Гончаров, А.К. Олейник, Г.Г. Гринченко // Збірник наукових праць Запорізького національного техніч. ун-ту. – 2003. – С. 100–101.
5. Влияние режимов дискретного упрочнения на эксплуатационные свойства

деталей автомобилей / Б.В. Савченко, В.Г. Гончаров, Н.Г. Александров, А.Л. Самсоник // *Автомобильный транспорт: Сб. научн. тр. Харьк. нац. авт.-дор. ун-та.* – 2005. – Вып.16. – С. 83–85. 6. Гончаров В.Г. Підвищення ресурсу транспортної техніки удосконаленням технології ремонту колінчастих валів: Автореф. ... канд. техн. наук: 05.22.20 / В.Г. Гончаров: Харківський національний автомобільно-дорожній ун-т. – Х., 2008. – 19 с. 7. Ткачук М.А. Розробка наукових основ створення сприятливих поверхневих дискретно-континуальних полів напружень у високонавантажених елементах машин / М.А. Ткачук, В.М. Шеремет, Г.В. Ткачук, А.В. Грабовський // *Механіка та машинобудування.* – 2009. – №1. – С. 147-156. 8. Ткачук Н.А. Параметрические модели элементов сложных систем как основа построения специализированных расчетных схем / Н.А. Ткачук, Ю.В. Веретельник, Ю.Я. Миргородский, Е.В. Пелешко // *Механіка та машинобудування.* – 2004. – № 2, т. 2. – С.79-84. 9. Ткачук Н.А. Решение задач расчетно-экспериментального исследо-

вания элементов сложных механических систем / Н.А. Ткачук, Г.Д. Гриценко, Э.В. Глуценко, Г.В. Ткачук // *Механіка та машинобудування.* – 2004. – № 2, т. 2. – С.85-96. 10. Ткачук Н.А. Концептуальные основы интегрированных систем проектирования, изготовления и исследования элементов сложных механических систем / Н.А. Ткачук, А.Н. Ковальчук, В.И. Кохановский, Л.С. Липовецкий // *Авиационно-космическая техника и технология.* – 2005. – № 1(17) - С.86-90. 11. Ткачук Н.А. Структура специализированных интегрированных систем автоматизированного анализа и синтеза элементов транспортных средств специального назначения / Н.А. Ткачук, С.Т. Бруль, А.Н. Малакей и др. // *Механіка та машинобудування.* – 2005. – №1. – С.184-194. 12. Ткачук М.А. Метод скінчених елементів у спеціалізованих інтегрованих системах автоматизованого аналізу і синтезу елементів механічних систем / Н.А. Ткачук, А.Д. Чепурний, В.І. Головченко, Є.А. Орлов // *Машинознавство.* – 2005. – №6. – С. 18-23.

УДК 521.4-2

**А. К. Каукаров, магистр, Т. М. Мендебаев, канд. техн. наук,  
В.Г. Некрасов, канд. техн. наук, М.К. Куанышев, канд. техн. наук**

## ИССЛЕДОВАНИЕ СУХОГО УПЛОТНЕНИЯ ПОРШНЯ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

### Введение

Анализ конструкций цилиндропоршневой группы современных ДВС показал наличие ряда существенных недостатков. В цилиндропоршневой группе происходят наиболее значительные потери на трение, достигающие 50% от всех механических потерь в двигателе. Использование гильзы цилиндра в качестве направляющей для движения поршня в сочетании с кривошипно-шатунным механизмом приводит к эллиптическому износу гильзы. Конструкция компрессионных колец допускает прорыв газов в картер, повышенный износ верхнего компрессионного кольца и верхней части гильзы цилиндра. Смазка гильзы цилиндра и охлаждение гильзы и поршня маслом приводит к снижению вязкости масла и его термическому разложению, а при сгорании пленки масла на стенке гильзы образуются высокотоксичные углеводороды.

### Формулирование проблемы

Отмеченные недостатки требуют пересмотра конструкции цилиндропоршневой группы в составе комплексной оптимизации ДВС [1]. Решить проблему разгрузки поршня от боковых сил может механизм, создающий линейное движение штока, связывающего поршень с кинематическим механизмом преобразования движения. Такие механиз-

мы разрабатывались и предлагались многими авторами на всем протяжении развития поршневых ДВС. Ряд специалистов работают над этой проблемой и в настоящее время, исследуя схемы аксиального, кулачкового, эксцентрикового, кулисного механизмов. В промышленном варианте для разгрузки поршня от боковых сил используется крейцкопфный вариант кривошипно-шатунного механизма. Однако такой механизм увеличивает габарит двигателя по высоте и применяется только на стационарных или судовых двигателях большой мощности. Перспективен одновалный кривошипно-кулисный механизм [2, 3].

### Пути решения проблемы

Механизм, задающий линейное движение штока поршня разгружает поршень от боковых сил, перенося их на узлы в картере двигателя при хорошей смазке. Кроме этого, такой механизм позволяет отделить цилиндр от картера, исключив угар масла и его термическое разложение. Но при этом возникает проблема снижения потерь на трение поршня в цилиндре. Использование подачи масла по штоку не применимо ввиду потерь масла и по экологическим требованиям. Задача снижения потерь на трение решается применением уплотнения без использования жидкой смазки (сухое уплотне-